

Impacte dels parcs eòlics a la mesoescala: estudi de la parametrització de turbines del model WRF-ARW

Autor: Jaume Ramon Gamon*

Tutors: Àlex Montornès, alex.montornes@vortex.es, Mireia Udina, mudina@meteo.ub.es
Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona, Espanya.

Resum: En un context d'important desenvolupament de l'energia eòlica, les estimacions d'aquest recurs en una zona concreta són claus a fi d'optimitzar l'extracció d'energia del flux de vent. En aquest sentit, la modelització dels efectes de les turbines sobre l'atmosfera local esdevé indispensable. La possibilitat d'emprar models meteorològics per a tal fi ha portat a l'equip del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) a incloure una parametrització de turbines al model mesoescalar *Weather Research and Forecasting* (WRF), la qual suposa l'efecte del parc eòlic com un embornal de moment i una font de turbulència. Les simulacions a 1 km realitzades al parc eòlic Sotavento-Galicia mostren dèficits de vent de fins a 0.8 m s^{-1} sobre les turbines tant en un règim sinòptic dominat pel pas d'un front per la zona, com per a un règim anticiclònic amb vents forts. Aquesta reducció del vent s'observa també a sotavent del mateix, en forma d'estela amb longituds de 26 km per a sengles casos. L'augment d'energia cinètica turbulenta (TKE) és de fins a $2.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ sobre el parc, amb reduccions de turbulència a sotavent. A més, s'ha observat un important augment de la cisalla sobre les màquines, i un dèficit a la part de sotavent. Aquests resultats han conduït a una major neutralització de la capa límit atmosfèrica (PBL) induïda per les turbines, reflectint-se en una major longitud de Monin-Obukhov sobre la vertical del parc eòlic quan aquest hi era present. Aquesta homogeneïtzació és més marcada per al cas d'estudi dominat pel pas d'un sistema frontal.

I. INTRODUCCIÓ

En un món en què les energies renovables pretenen substituir aquelles fonts basades en els combustibles fòssils, l'energia eòlica ha presentat un important creixement des de finals de la dècada dels 90 fins l'actualitat (Vázquez et al 2017, i Kaldellis i Zafirakis 2011), amb un gran nombre de parcs eòlics distribuïts arreu del món. Molts dels promotors dels parcs eòlics gestionen instal·lacions ja construïdes, pel que la revisió de les estimacions inicials del recurs eòlic, realitzades en el moment de bastiment, esdevé indispensable. D'altra banda, hi ha projectes nous que es poden veure afectats per les esteles de parcs propers si es troben a la seva àrea d'influència, augmentant les pèrdues i la incertesa de la inversió. En aquest context, els models de mesoescala, tals com el *Weather Research and Forecasting*, WRF (Skamarock et al 2008) presenten algunes limitacions atès que no consideren els efectes de les turbines en el model (Christiansen i Hasager 2005).

A l'actualitat, la modelització eòlica comença a introduir aquests efectes en l'avaluació del recurs. Les metodologies del tipus *Computational Fluid Dynamics* (CFD), amb algorismes com *Large Eddy Simulation*, LES (Smagorinsky 1963), poden reproduir les pertorbacions induïdes pels aerogeneradors en el flux de vent amb resolucions molt fines (Wang 2012). No obstant, aquestes metodologies presenten un cost computacional elevat. Per la seva banda, els models meteorològics de predicció del temps (o en anglès *Numerical Weather Prediction*, NWP) es presenten com una alternativa a les metodologies CFD a l'hora d'avaluar el recurs eòlic per a una zona concreta, incorporant els processos físics de l'atmosfera (radiació, microfísica, etc...) que poden tenir un comportament rellevant a la capa límit atmosfèrica (PBL, sigles en anglès de *Planetary Boundary Layer*). Els models de reanàlisi (Warner 2011) esdevenen una bona eina perquè reproduïxen el comportament de l'atmosfera a qualsevol lloc del món per un període representatiu (10, 20 o 30 anys segons els requisits de la indústria). Tanmateix, aquests requereixen

una gran quantitat de recursos computacionals i només es poden executar en grans institucions meteorològiques. No obstant, aquestes dades de reanàlisi es poden introduir en models de mesoescala (Pielke 2002) o d'àrea limitada mitjançant tècniques de *downscaling*. Així, es pot millorar la resolució dels processos físics i, per tant, reduir la incertesa en l'avaluació del recurs. Una vegada es configura i executa la simulació d'àrea limitada, es pot determinar i corregir l'error del model mitjançant observacions al lloc (p. ex. 1 any) i eines estadístiques. L'augment de la potència computacional en els darrers anys ha permès assolir resolucions d'entre 1 i 3 km (preses com a estàndards a la indústria) de manera que els parcs eòlics poden començar a tenir un efecte significatiu en els nodes de la malla.

Durant els darrers anys, l'equip del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) ha treballat en diverses parametritzacions a fi d'introduir els efectes de les turbines en les simulacions de mesoescala. Fruit d'aquesta feina, la versió 3.3 del WRF i posteriors inclouen una parametrització de parc eòlic basat en l'article de Fitch et al (2012). Aquesta aproximació es basa en el fet que no tota l'energia cinètica extreta de l'atmosfera és transformada en energia elèctrica útil i aprofitable per al consum. Una part d'aquesta, produeix turbulència, entesa com energia cinètica turbulenta, TKE (Stull 1988). La parametrització és presentada amb major detall a l'Apèndix A.

A partir d'aquest esquema s'han realitzat diversos estudis que han avaluat la robustesa de la parametrització de turbines del WRF, així com el seu impacte local en la PBL. Fitch et al (2012) van realitzar experiments amb simulacions ideals en els quals van introduir un parc eòlic de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, format per 100 turbines inicialitzat amb una capa límit en règim neutral i temperatura superficial i vent uniformes en tot el domini. Els resultats de les simulacions van mostrar una reducció de vent de fins a 1.5 m s^{-1} sobre les màquines, respecte a una simulació sense turbines. Els efectes de reducció de la velocitat del vent eren observables fins a 60 km a sotavent. No obstant, s'hi trobà una acceleració del vent a prop de la superfície del parc, d'aproximadament d'un 11%. Pel que fa a la TKE, aquesta es

* Adreça electrònica: jaumeramong@icloud.com

va veure incrementada en un factor 7 sobre el parc quan aquest era representat. A l'estudi de Fitch et al (2013) s'avaluà la interacció entre un parc eòlic i la PBL a través d'un cicle diari. Els resultats mostraren una estela major durant el període nocturn, arribant fins a 55 km a sotavent del parc, deguda a l'estabilitat d'estratificació sobre l'àrea del rotor i la poca mescla vertical turbulenta. Això conduïa a la formació d'un jet en nivells baixos, pel que la cisalla era elevada i la turbulència augmentava en un factor 20 sobre l'àrea del rotor. Jiménez et al (2014) aplicaren la parametrització de turbines per avaluar el dèficit de potència associat a les esteles de les turbines eòliques. L'estudi es basa en observacions i resultats de modelitzacions en el parc eòlic de Horns Rev (Dinamarca). Els resultats indicaren que els models de mesoescala, tals com el WRF, són capaços de reproduir qualitativament aquest dèficit de potència a l'escala del parc eòlic.

En aquest treball, es realitzarà un estudi de l'efecte que té aquesta parametrització a les simulacions de mesoescala. Per tal de fer-ho, es portaran a terme un seguit de d'experiments sobre el parc eòlic de Sotavento-Galícia amb el model de mesoescala WRF. La modelització es realitzarà en dos escenaris amb 1 km de pas de malla: un amb turbines i l'altre sense introduir-les. La comparativa de cada parella de simulacions permetrà inferir directament l'impacte dels parcs eòlics. Tot el procés serà realitzat per a dos règims sinòptics diferents (Fig. 1): un anticiclònic amb vent fort i un corresponent al pas d'un front, els quals es detallen a la Secció 2.

El treball s'estructura en tres apartats. En primer lloc, es presenta la metodologia emprada per realitzar l'estudi, detallant la configuració del model, així com els règims sinòptics estudiats. Seguidament, es presenten els resultats de les simulacions obtingudes amb WRF i es procedirà a la seva interpretació física. Finalment, aquesta anàlisi permetrà concloure la consistència de l'esquema de turbines emprat a l'hora d'incloure els efectes dels parcs eòlics en les simulacions de mesoescala.

II. METODOLOGIA

En aquest punt es detallen les eines i mètodes emprats en aquest estudi. Per una banda, s'introdueix la regió geogràfica

que ha estat escollida per realitzar les simulacions. Seguidament, s'explica amb detall la configuració del model WRF per realitzar l'estudi, així com el procediment seguit per tal d'efectuar les anàlisis.

Per realitzar els experiments que es presentaran en aquest estudi, s'ha escollit el parc de Sotavento-Galícia. Es tracta d'un parc experimental situat a la localitat de Xermade, a la província de Lugo, al nord-oest de la Península Ibèrica. Les seves coordenades geogràfiques són 43°21'N i 7°53'W. Un total de 24 turbines eòliques conformen el parc (per a més informació, veure l'Apèndix B), el qual està dispostat aproximadament en la direcció N-S. El fet d'emprar un parc amb dades obertes permet dotar el treball de més transparència a l'hora de poder repetir els experiments si és necessari, tal i com requereix el mètode científic.

La climatologia de la zona del parc de Sotavento està dominada pel pas de sistemes frontals atlàntics, combinats amb períodes de calmes anticiclòniques (Martínez i Pérez 1999). Aquest factor permet l'elecció de dos casos d'estudi amb condicions sinòptiques molt diferents. En aquest estudi, s'han escollit els dies 13-14 de gener de 2016 i 21-22 de gener del mateix any. El primer episodi està dominat pel pas d'un sistema frontal, el qual afecta la zona d'estudi durant la nit del 13 al 14 de gener i està associat al sistema de baixes pressions centrat al mar Cantàbric (Fig. 1a). El segon cas d'estudi estarà realitzat sobre condicions sinòptiques dominades per les altes pressions, amb un vent relativament fort i de direcció constant. Aquesta configuració sinòptica es presenta a la Fig. 1(b).

Les simulacions d'aquest estudi han estat realitzades amb el model WRF-ARW en la seva versió 3.7.1. El model és configurat amb tres dominis de 52x52 punts cadascun. Es realitza un niament telescòpic, de manera que el parc eòlic d'estudi és al centre de les malles i aquests dominis són concèntrics (Fig. 2). El niament es configura en una direcció. No se segueix l'aproximació proposada en els estudis previs (Fitch et al 2012, Fitch et al 2013, i Jimenez et al 2014) perquè no queda clar si el niament en doble direcció proporciona resultats més acurats. Com que l'estudi se centrarà en el domini més petit (Fig. 2), és preferible minimitzar el nombre de factors que el puguin pertorbar. No obstant, caldria nous experiments per tal de resoldre aquesta qüestió, els quals es deixen com a treball futur.

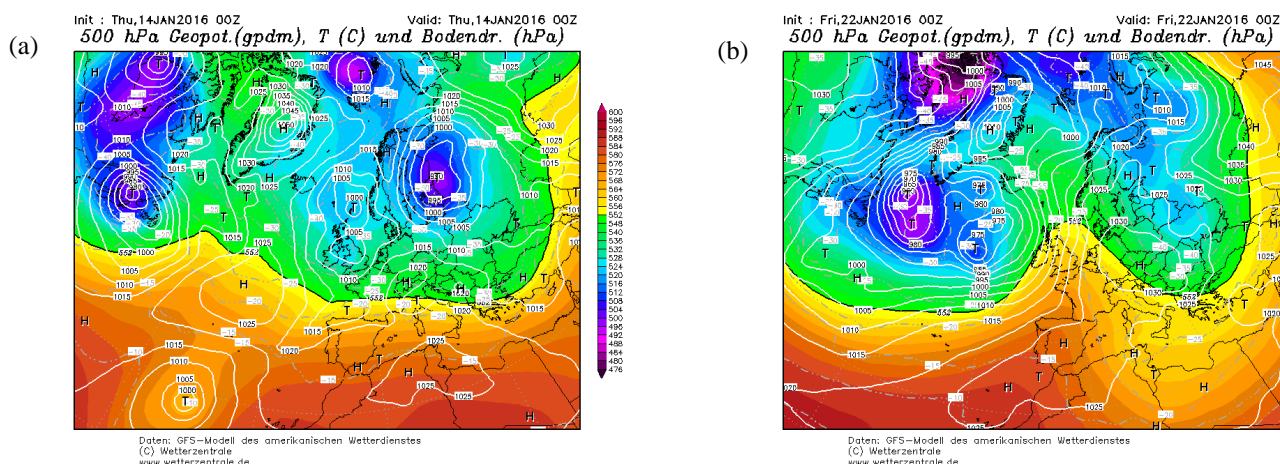


Figura 1: Situació sinòptica dels dies (a) 14 de gener de 2016 a les 00Z i (b) del 22 de gener de 2016 a les 00Z. Es presenta l'alçada de geopotencial a 500 hPa en dampt (mapa de contorn), la temperatura en °C a aquest mateix nivell (línies grises discontinües) i la pressió en superfície (línies sòlides blanques). Font: Wetterzentrale.

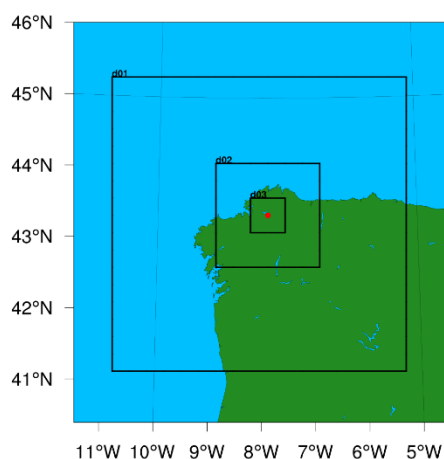


Figura 2: Disseny dels dominis de les simulacions i localització del parc eòlic Sotavento-Galicia (punt vermell) en l'àrea de treball.

Els dominis tenen passos de malla de 9 km, 3 km i 1 km, respectivament. L'últim d'aquests, de resolució més fina, serà l'utilitzat per realitzar l'anàlisi de les dades de sortida. Aquest es presenta a la Fig. (3), en la qual s'ha afegit la topografia que fa servir el model i les turbines que conformen el parc. El pas de temps emprat és de 27 s en el domini superior. En la vertical, el model es configura amb 41 nivells, situant 20 d'aquests igualment espaiats per sota dels 200 m. El cim del model se situa a 100 hPa.

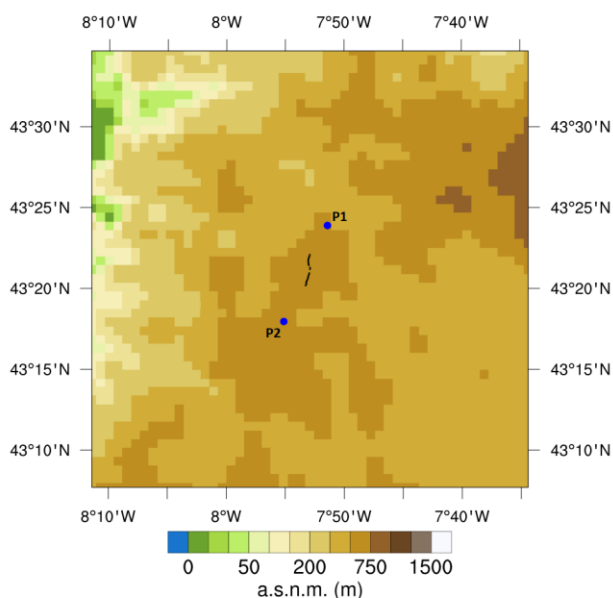


Figura 3: Topografia del domini de resolució més fina. Els aerogeneradors del parc es representen amb punts negres. Els punts blaus P1 i P2 seran utilitzats més endavant en el treball.

La física del model és configurada d'acord amb la que més s'ajusta a la indicada pels autors de la parametrització de turbines (Fitch et al 2012). Aquesta és detallada a la Taula I. No s'habilita la parametrització de cúmuls, ja que per a la resolució del model en el treball, aquest pot reproduir-los per si mateix.

Les condicions inicials i de contorn necessàries per inicialitzar el model han estat preses del reanàlisi ERA-Interim del Centre Europeu de Previsions Meteorològiques a Mitjà

Termini, o ECMWF amb les seves sigles en anglès (Dee et al 2011). Les simulacions comencen a les 6 h UTC tant del dia 13 de gener de 2016 com del 21 de gener de 2016 i són executades a 30 h. Les 6 primeres hores no seran analitzades a fi d'evitar l'efecte d'*spin-up* del model i les 24 hores restants seran les útils per als experiments, de manera que els fenòmens sinòptics d'interès queden al centre de la simulació. Escollint aquest horitzó de simulació permet respectar les dades de reanàlisi, introduint els efectes dinàmics de la mesoescala degut a la millora en la resolució, però sense deixar desenvolupar completament la física del model (Montornès et al 2015).

Taula I: Opcions escollides per als diferents esquemes físics emprats en les simulacions.

Esquema	Opció
Microfísica	Kessler (Kessler 1969)
Ona curta	Dudhia (Dudhia 1989)
Ona llarga	RRTM (Mlawer et al 1997)
Capa superficial	MM5 Similarity (Paulson 1970, Dyer et al 1970, Webb 1970, Beljaars 1994, i Zhang i Anthes 1982)
Terreny	Unified Noah Land Surface Model (Tewari et al 2004)
Capa límit	Mellor-Yamada Nakanishi Niino (MYNN) level 2.5 (Nakanishi and Niino 2009)

Amb aquesta configuració del model, per a cada cas d'estudi, es realitzaran dues simulacions. Una sense turbines es prendrà com a simulació de control (CTRL). En l'altra, s'introduirà el parc i s'activarà la parametrització de turbines del model WRF (identificada amb TUR). Es calcularà la diferència entre ambdues simulacions (TUR-CTRL), permetent així visualitzar l'efecte net del parc eòlic en la PBL.

III. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A continuació es presenten els resultats de l'estudi. Aquesta secció es dividirà en dos apartats. En primer lloc, s'analitzarà el cas d'estudi corresponent al pas d'un front, el qual passa per la zona del parc aproximadament a les 00 h UTC del 14 de gener de 2016. En segon lloc, es passarà a avaluar el cas anticiclònic, caracteritzat per un vent relativament fort i de direcció aproximadament constant. Després es presentarà una discussió i anàlisi dels resultats.

A. Regim sinòptic dominat pel pas d'un front

La Fig. (4) presenta plans horitzontals realitzats a l'alçada de boixa (i. e. 50 metres respecte la superfície), essent aquesta l'elevació al voltant de la qual s'espera trobar un major impacte del parc eòlic sobre les variables estudiades. La Fig. (4a), corresponent a un instant previ a l'arribada del sistema frontal, mostra un dèficit en el mòdul del vent que s'estén en forma d'estela des de la localització del parc fins aproximadament uns 20 km a sotavent de mateix. En aquest moment, en què dominen els vents del sud-oest, es produeix

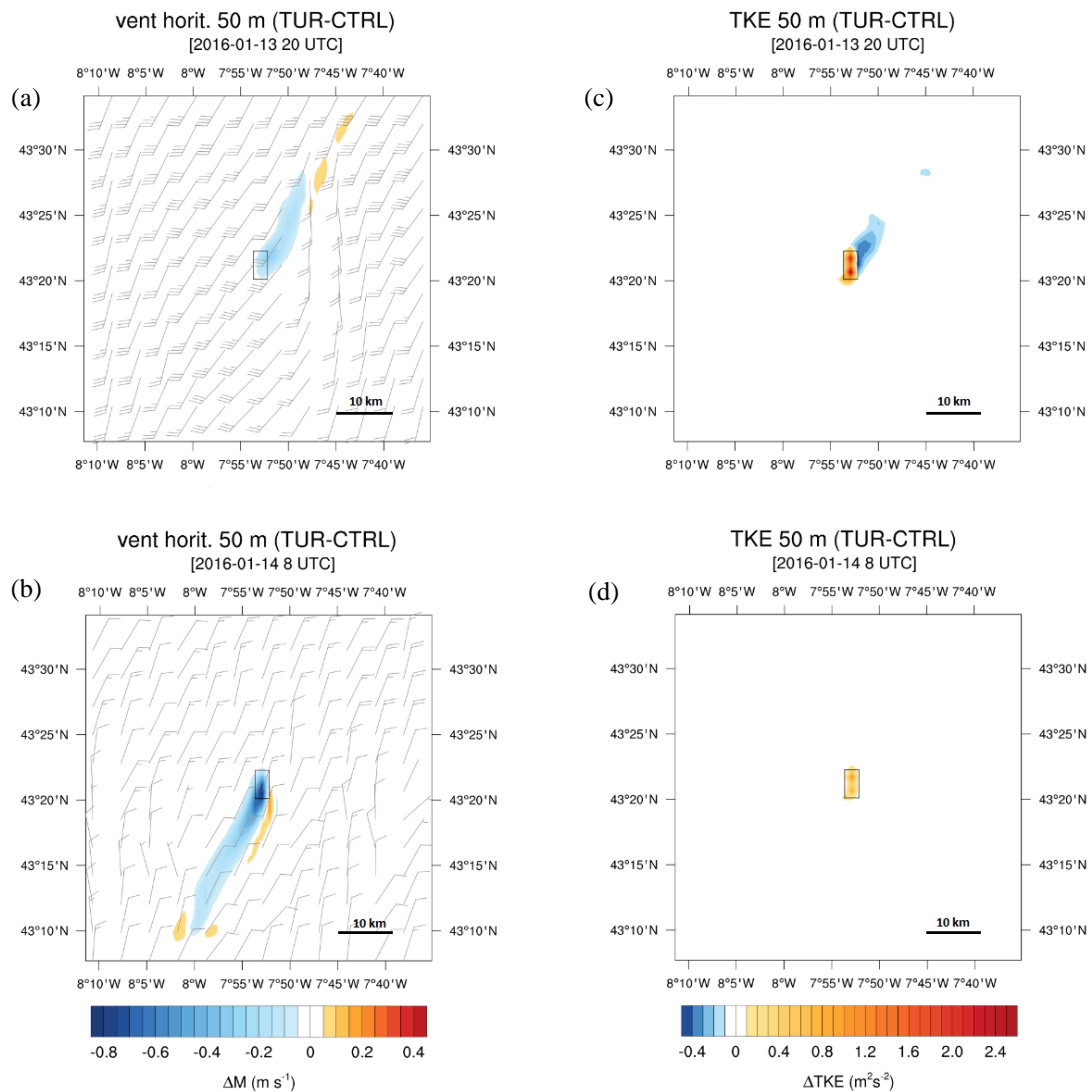


Figura 4: Seccions horitzontals realitzades a l'alçada de boixa (i. e. 50 m) de la diferència del mòdul del vent horitzontal (M) entre les simulacions TUR i CTRL i camp de vent en nusos de la simulació TUR a les (a) 20 h UTC del 13 de gener i (b) a les 8 h UTC del 14 de gener. Seccions horitzontals realitzades a l'alçada de boixa (i. e. 50 m) de la diferència de TKE entre les simulacions TUR i CTRL a les (c) 20 h UTC del 13 de gener i (d) a les 8 h UTC del 14 de gener. El rectangle del centre representa el parc eòlic.

una reducció del vent que arriba a valors de 0.5 m s^{-1} sobre el parc i al nord-est d'aquest.

La Fig. (4b) es correspon a un instant de temps posterior al pas del sistema frontal. El gir de vents és pràcticament de 180° (de sud-oest a nord-est), pel que l'estela s'observa sobre el parc i al sud-oest d'aquest. Es nota una reducció del vent sobre la instal·lació eòlica superior a 0.8 m s^{-1} , major que l'observada en la Fig. (4a). Dèficits superiors a 0.1 m s^{-1} s'observen fins gairebé 25 km a sotavent. Aquests resultats són compatibles amb les suposicions fetes per Fitch et al (2012), en les quals la presència d'un parc eòlic suposa un embornal de moment (veure Apèndix A per a més informació). Tot i que el mòdul del vent és menor en els moments post-frontals, la seva direcció és aproximadament paral·lela a la disposició de les turbines (i. e. direcció N-S). Per aquest motiu, l'efecte d'embornal és major i s'observa una reducció més gran del mòdul del vent. D'altra banda, s'aprecia una petita acceleració del vent tant a la Fig. (4a) com a la Fig. (4b). A la primera, aquest augment del vent és observable a 10 km a sotavent del

parc, i s'estén fins a uns 26 km d'aquest. A la Fig. (4b), l'acceleració s'aprecia al flanc esquerre de l'estela junt a les turbines, amb un augment de vent de 0.4 m s^{-1} . Una petita acceleració (i. e. 0.1 m s^{-1}) també s'observa a ambdós costats de l'estela 25 km a sotavent. Físicament, aquest comportament és reflex de l'efecte de gir d'Ekman (Stull 1988). Este fenomen provoca la desviació de l'estela cap a l'esquerra del vent dominant. Així, es formen línies de convergència i divergència que desencadenen moviments verticals que expliquen les acceleracions del vent al final de l'estela i en els seus flancs.

Els resultats obtinguts per a la TKE mostren, en ambdós casos, un augment de turbulència sobre les turbines, amb un increment màxim de $2.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ abans de l'arribada del front (Fig. 4c). Aquest resultat és consistent amb la segona suposició efectuada per Fitch et al 2012, que suposa el parc eòlic com una font de turbulència (veure Apèndix A). En aquest moment de la simulació, on els vents són més forts, també s'observa una reducció de la turbulència a sotavent del parc, que s'estén en forma d'estela fins uns 7 km, amb dèficits de $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

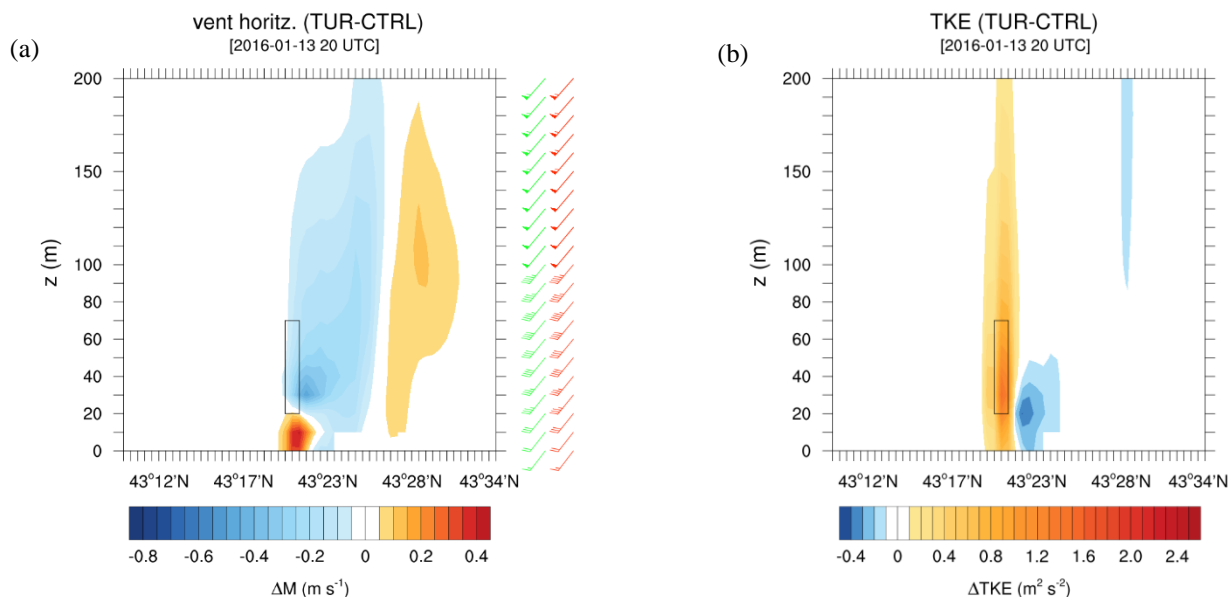


Figura 5: Seccions verticals realitzades al llarg de les esteles de les Figs. (4a) i (4c) respectivament, de (a) la diferència del mòdul de vent i direcció i velocitat del vent en nusos per a la simulació CTRL (verd) i TUR (vermell) i (b) diferència de TKE entre les simulacions TUR i CTRL a les 20 h UTC del 13 de gener de 2016. Es presenta amb un rectangle l'àrea del rotor mitjana de les turbines del parc.

Aquesta estela no s'observa a la Fig. (4d), on l'augment de TKE sobre el parc (que pren valors de fins a $1.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) és menor a l'observat en el moment prefrontal (Fig. 4c).

La generació de turbulència està determinada, generalment, per factors tèrmics (fluxos verticals de calor) o mecànics (cisalla del vent). Com que els dos casos que s'han escollit presenten vents relativament forts, aquí domina el segon mecanisme. A sotavent, la presència de les turbines redueix la cisalla vertical en aquesta zona i, conseqüentment, s'observa un dèficit de TKE.

Com que els vents són més forts durant els moments anteriors a l'arribada del front, la cisalla vertical induïda pel parc serà més elevada. Així, la generació de turbulència i els seus efectes a sotavent seran majors durant els instants prefrontals (Fig. 4c). Quan els vents són més fluïxos durant els moments post-frontals, els efectes turbulents de les turbines no són observables a sotavent, reflectint-se això en l'absència d'estela a la Fig. (4d).

Una vegada analitzat l'efecte del parc eòlic sobre un pla horitzontal, es passa a avaluar-lo en la vertical. S'ha efectuat una representació en forma de tall vertical des de la superfície fins a 200 m de la diferència del mòdul de vent (Fig. 5a) i de la turbulència (Fig. 5b) al llarg de les esteles observades en les Figs. (4a) i (4c), respectivament. En la Fig. (5a), s'aprecia una reducció de vent de fins a 0.5 m s^{-1} sobre el parc (aproximadament a una alçada de 35 m) i a sotavent d'aquest, tal i com es feia notar a la Fig. (4a). La reducció del vent és notable fins a elevacions de 150 m respecte de la superfície. No obstant, el vent augmenta (amb valors de fins a 0.4 m s^{-1}) a prop de la superfície sobre el parc quan aquest es té en compte. Aquest fet respon als moviments ascendents i descendents generats per la formació de les línies de convergència i divergència degut al gir d'Ekman. El mòdul augmenta amb l'alçada, passant de 8 m s^{-1} en superfície a 28 m s^{-1} a 200 metres. La representació amb barbes no presenta resolució suficient per avaluar la diferència de cisalla vertical deguda al canvi de velocitat amb l'altura entre les simulacions

TUR i CTRL. Tanmateix, no s'aprecia un canvi important de direcció entre ambdues simulacions. Per la seva banda, els efectes d'augment de turbulència sobre el parc són observables fins a altures superiors a 200 metres (Fig. 5b). En aquest cas, s'aprecia la reducció de TKE a sotavent de la instal·lació eòlica, tal i com s'observava a la Fig. (4c).

Fins ara només s'havien considerat les anàlisis per a un instant de temps donat. Tanmateix, la dinàmica atmosfèrica és canviant en la zona del parc durant aquest cas d'estudi. És necessari, per tant, un estudi de l'evolució temporal dels diferents paràmetres d'interès. Primerament, es considera la variació amb el temps dels perfils verticals de vent (Fig. 6a) i turbulència (Fig. 6b) sobre la instal·lació eòlica. S'escullen 4 instants de temps, amb una separació de 6 hores entre aquests, de manera que dos d'ells es corresponen a un moment previ a l'arribada del front (i. e. 18 h UTC del 13 de gener i 00 h UTC del 14 de gener) i els altres dos a instants post-frontals (i. e. 6 h UTC i 12 h UTC del 14 de gener).

A la Fig. (6a) s'observa la reducció en el mòdul del vent des de l'altura de boixa fins a uns 300 metres. Aquest dèficit de velocitat és màxim a 6 h UTC del 14 de gener, i pren un valor superior a 0.9 m s^{-1} . La reducció és mínima a les 18 h UTC del 13 de gener i a les 12 h UTC del 14 de gener. Com ja s'ha comentat, per a velocitats de vent similars, la reducció del vent és major si la seva direcció és aproximadament paral·lela al parc. Durant el moment del pas del front i el primer moment postfrontal (i. e. 00 h UTC i 6 h UTC) el vent té component N-NE (Fig. 4c), paral·lel a la disposició del parc. Per tant, queda justificat el major dèficit de mòdul de vent durant aquests instants. D'altra banda, també s'observa l'acceleració del vent a prop de superfície, essent aquesta major durant els moments prefrontals (pren valors de fins a 0.4 m s^{-1}), responent aquesta a la formació dels corrents verticals associats a les zones de convergència i divergència (no s'inclou el gràfic de velocitat vertical per economitzar l'espai d'aquest treball). A partir de 400 metres, la variació del vent deguda al parc és pràcticament nul·la.

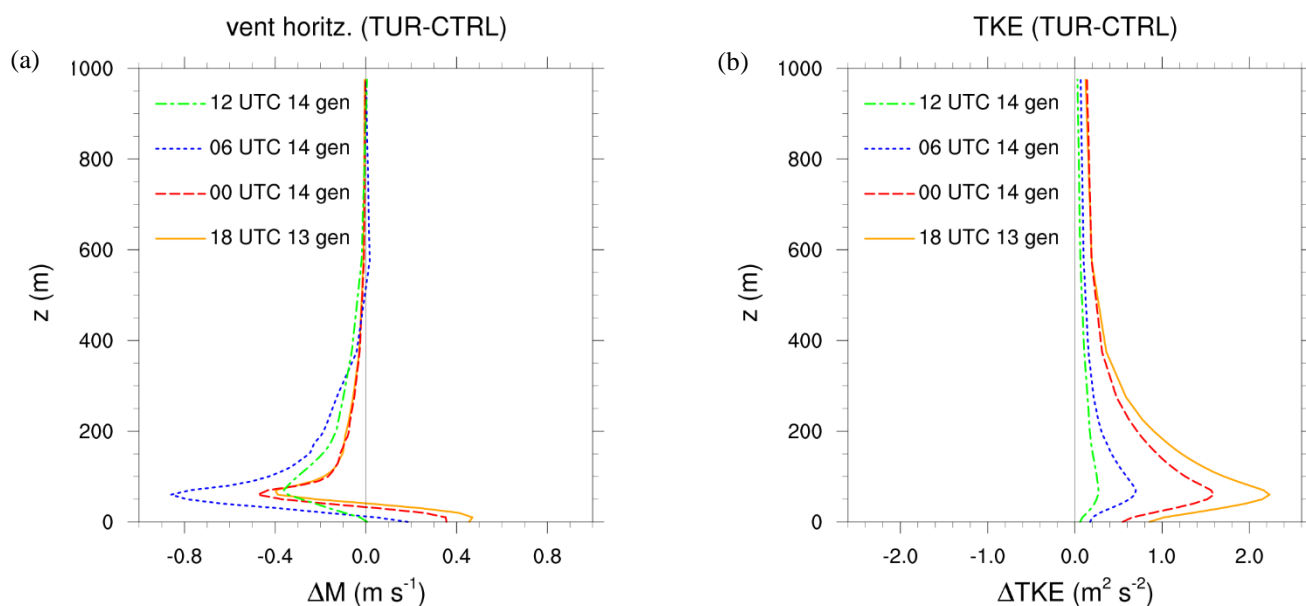


Figura 6: Evolució temporal dels perfils verticals de les diferències del (a) mòdul de vent i (b) TKE entre les simulacions TUR i CTRL sobre el parc eòlic a les 18 h UTC del 13 de gener, 00 h UTC, 06 h UTC i 12 h UTC del 14 de gener.

Un comportament similar s'observa per a la turbulència (Fig. 6b). L'augment de TKE sobre el parc és màxim al voltant de l'altura de boixa, amb valors que superen els $2.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ a les 18 h UTC del 13 de gener. Com ja s'ha interpretat, la major producció de TKE durant els moments anteriors a l'arribada del front és conseqüència de que es donessin vents més forts, amb la producció de més cisalla.

Per a un detall més fi, s'ha representat l'evolució temporal cada 30 minuts de la turbulència (Fig. 7) als punts P1 i P2 marcats a la Fig. (3).

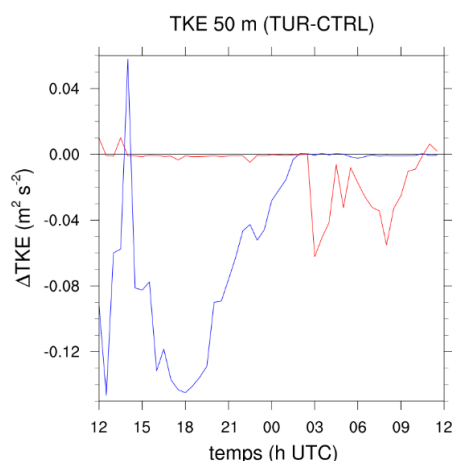


Figura 7: Evolució temporal de la diferència de TKE entre les simulacions TUR i CTRL. La línia contínua blava és l'evolució al punt P1 (veure Fig. 3) i la línia contínua vermella és l'evolució al punt P2 (veure Fig. 3).

Durant el moment prefrontal, el punt P1 queda a sotavent degut al domini de vents del sud-oest sobre la zona. En la Fig. (7), s'observa aquest dèficit de turbulència (amb pèrdues de fins a $0.14 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ respecte el cas CTRL) en la primera meitat de la simulació. Passat aquest temps, el canvi de direcció dels vents fa que aquesta zona no sigui afectada pel parc, queda a sobrent i les variacions de turbulència són nul·les. El punt

P2, presenta un comportament contrari. Aquesta zona presenta reduccions de turbulència a la segona meitat de la simulació, en els moments post-frontals. No obstant, el dèficit de TKE arriba fins a valors de $0.06 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, essent aquests molt menors que els observats en el punt P1. Aquesta diferència en els resultats torna a obeir als vents més forts enregistrats durant els moments prefrontals i la formació d'una estela visible (i. e. amb reduccions superiors a $0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ respecte el cas CTRL) a sotavent dels aerogeneradors.

Finalment, es passa a estudiar l'evolució de l'estabilitat de la capa límit mitjançant el càlcul i representació dels paràmetres de la velocitat de fregament (u^*) i longitud de Monin-Obukhov (L). Primerament, la velocitat de fregament (Fig. 8a) augmenta sobre el parc quan aquest hi és present (amb augments de fins a 0.08 m s^{-1}), ja que la seva presència provoca una cisalla vertical major. A sotavent, s'observa un dèficit superior a 0.02 m s^{-1} que s'estén en forma d'estela fins a uns 10 km del parc. Aquests resultats de mesura de la cisalla concorden i són compatibles amb els comentats a la Fig. (4c), en què notàvem un augment de turbulència sobre el parc i una reducció a sotavent.

El flux de calor sensible (no mostrat per economitzar l'espai del treball) presenta valors menors sobre la zona del parc (de l'ordre d' 1 W m^{-2}) quan s'introdueixen les turbines. La reducció dels fluxos és sinònim d'una tendència a la neutralització de la capa límit, induïda per la mescla produïda per les turbines. A sotavent, i en la part més propera al parc, s'observa un augment d'aquest flux, arribant fins a 2.5 W m^{-2} .

A partir de la velocitat de fregament i del flux de calor sensible es calcula la longitud de Monin-Obukhov. La seva representació (Fig. 8b) mostra un augment sobre la zona del parc i una petita reducció a sotavent. Aquest augment és reflex del fet que les turbines siguin una font de turbulència. Per a unes condicions meteorològiques donades, la mescla vertical serà major quan aquestes hi siguin presents, traduint-se això en una major homogeneïtzació de la PBL i un augment del paràmetre L . A sotavent però, s'observa un comportament contrari.

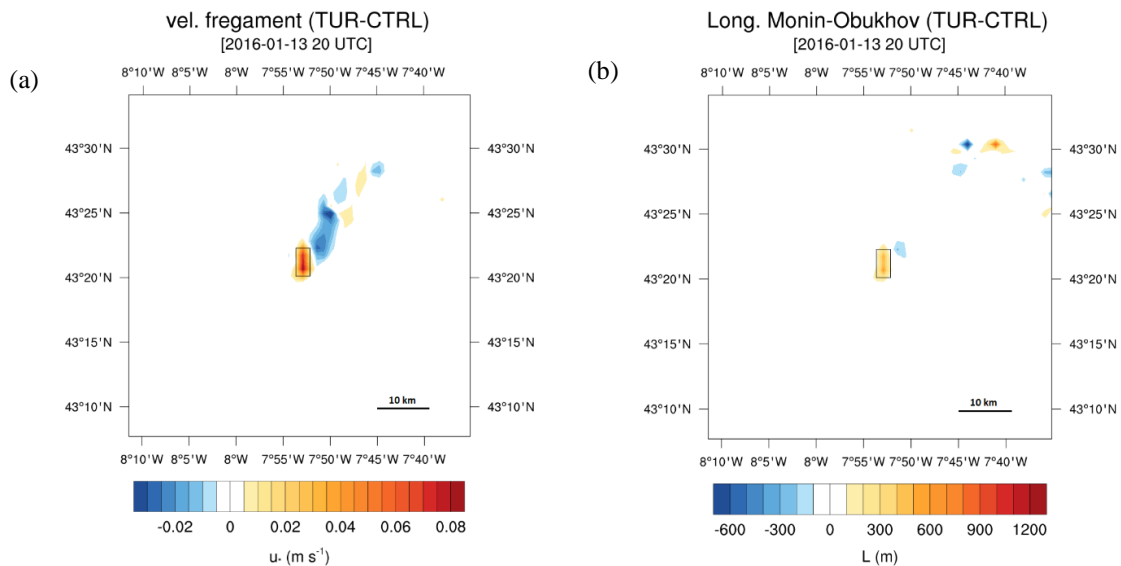


Figura 8: Mapa de diferència de (a) velocitat de fregament i (b) longitud de Monin-Obukhov entre les simulacions TUR i CTRL en capa superficial per a les 20 h UTC del 13 de gener de 2016. El rectangle del centre representa el parc eòlic.

B. Regim sinòptic anticiclònic amb vent fort

En aquest punt es passa a estudiar el cas esdevingut entre les 12 h UTC del 21 de gener i les 12 h UTC del 22 de gener de 2016, dominat per un vent fort i de direcció constant associat a un règim sinòptic anticiclònic (Fig 1b). El mapa de diferències de vent a l'alçada de boixa (Fig. 9a) mostra un dèficit de fins a 0.6 m s^{-1} del mòdul sobre el parc i a la part N-NE del mateix, amb predomini de vents del S-SO. Aquests resultats de reducció del vent degut a l'obstacle que suposen les turbines també concorda amb els de Fitch et al (2012) i amb els observats per al cas d'estudi del Subapartat A. d'aquesta secció (Figs. 4a i 4b). L'impacte dels aerogeneradors en el mòdul del vent és notable fins a 26 km a sotavent del parc. També s'observa una petita acceleració

del vent als flancs dret i esquerre de l'estela, associats als moviments verticals induïts pel gir d'Ekman. Com que el vent és aproximadament constant durant tota la simulació i l'estela s'observa a la part N-NE de la instal·lació eòlica, només es representa un instant de temps per economia d'espai.

Pel que fa la TKE (Fig. 9b), aquesta és màxima sobre el parc, i arriba a valors de $2.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Aquest valor és lleugerament menor que l'observat per al moment prefrontal de l'estudi anterior (Fig. 4c). Això està relacionat amb l'enregistrament de vents més fluïxos durant el cas anticiclònic (i. e. $10\text{-}13 \text{ m s}^{-1}$ enfront els 21 m s^{-1} del cas anterior). S'observa un petit dèficit de TKE, a sotavent i en forma d'estela d'uns 3 km de longitud que arriba a valors de $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

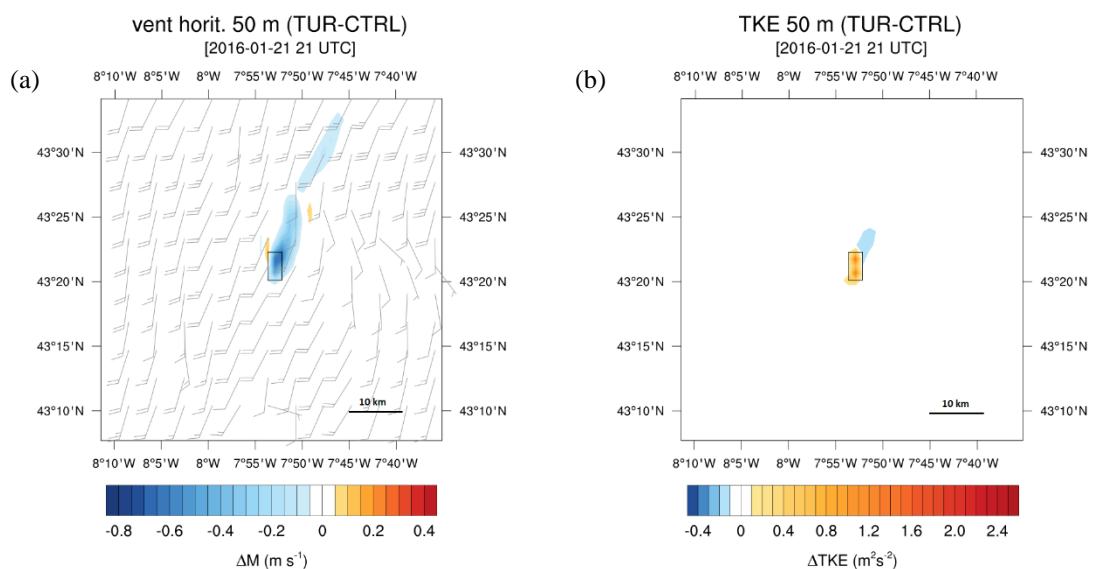


Figura 9: Seccions horitzontals realitzades a l'alçada de boixa (i. e. 50 m) de (a) la diferència del mòdul del vent horitzontal (M) entre les simulacions TUR i CTRL i camp de vent en nusos de la simulació TUR i (b) diferència de TKE a les 21 h UTC del 21 de gener de 2016. El rectangle central representa el parc eòlic.

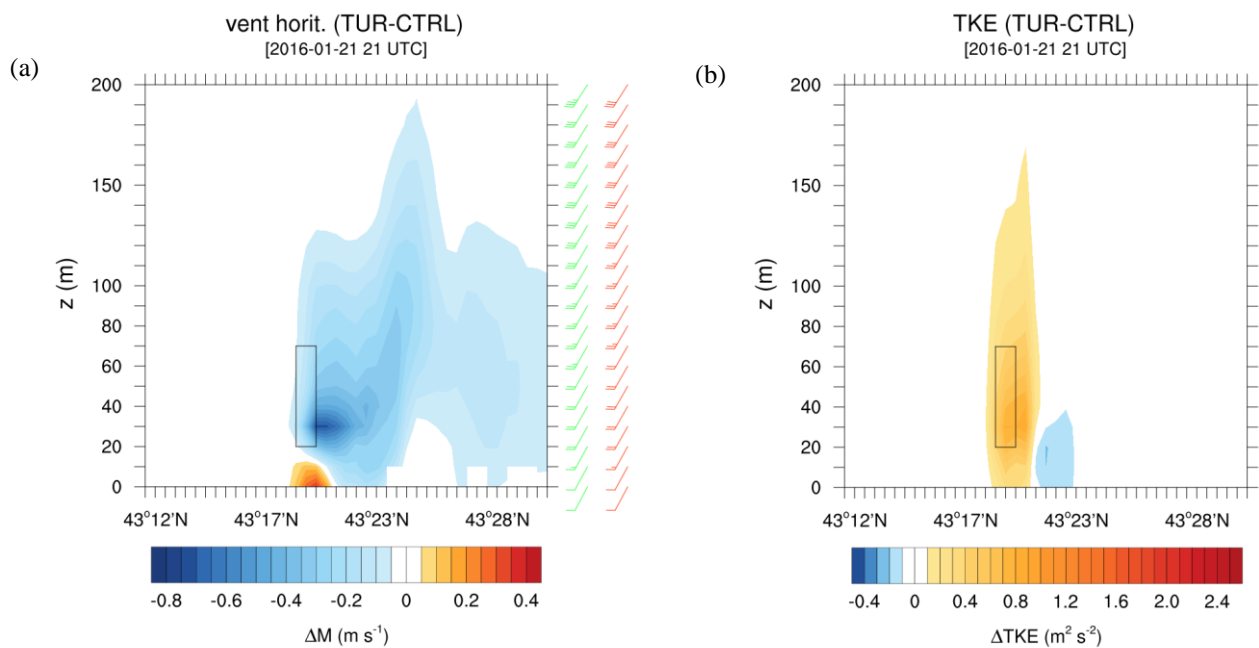


Figura 10: Seccions verticals realitzades al llarg de les esteles de les Figs. (9a) i (9b) respectivament, de (a) la diferència del mòdul de vent i direcció i velocitat del vent en nusos per a la simulació CTRL (verd) i TUR (vermell) i (b) diferència de TKE entre les simulacions TUR i CTRL a les 20 h UTC del 13 de gener de 2016. Es presenta amb un rectangle l'àrea del rotor mitjana de les turbines del parc.

En la vertical, s'observa una variació del vent des de la superfície fins gairebé uns 200 m (Fig. 10a). El màxim dèficit s'aprecia a uns 30 aproximadament, amb valors que decreixen fins a 0.6 m s^{-1} quan s'hi afegeixen les turbines. Tanmateix, el vent augmenta a prop de la superfície (amb valors que arriben fins a 0.3 m s^{-1}) i en la zona del parc. La cisalla vertical del vent és marcada, passant de valors de 5 m s^{-1} en superfície a

18 m s^{-1} a 200 m. En aquest cas, tampoc s'observen canvis de direcció notables induïts per les turbines. Per la seva banda, l'augment de TKE (Fig. 10b) és notable fins a uns 150 metres sobre les turbines. Un petit dèficit és observat en punts propers a sotavent. Aquesta diferència en la turbulència respon novament a la generació de cisalla sobre el parc i a la reducció de la mateixa a sotavent.

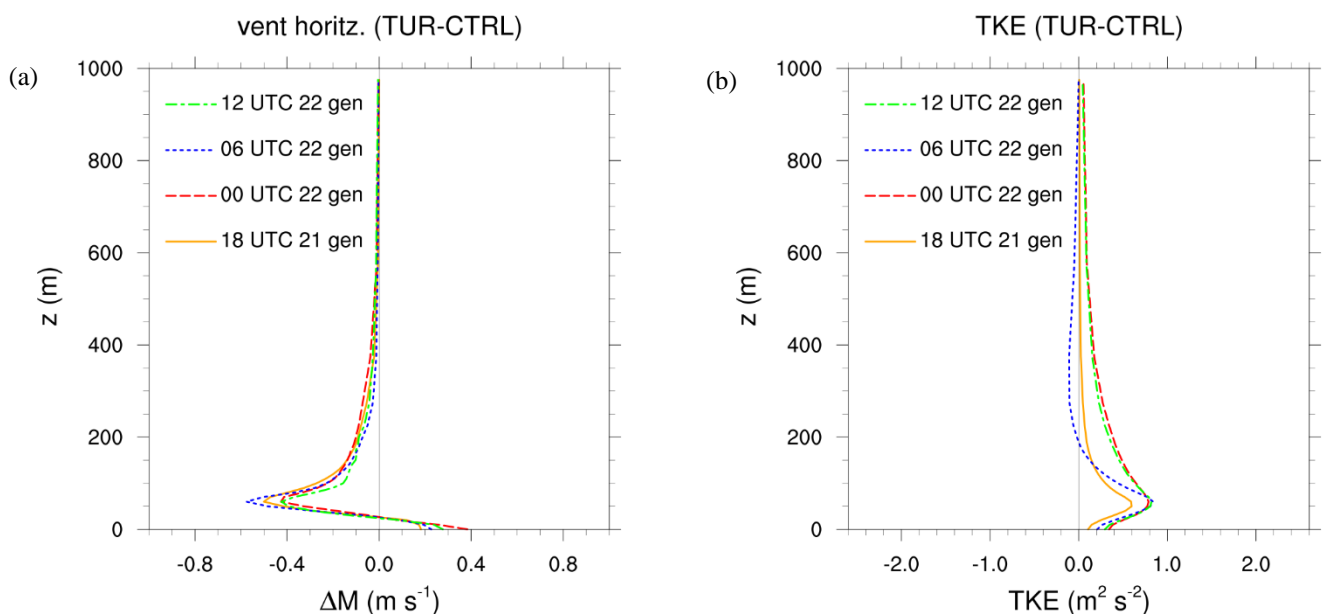


Figura 11: Evolució temporal dels perfils verticals de les diferències del (a) mòdul de vent i (b) TKE entre les simulacions TUR i CTRL sobre el parc eòlic a les 18 h UTC del 21 de gener, 00 h UTC, 06 h UTC i 12 h UTC del 22 de gener.

L'evolució temporal cada 6 hores del perfil vertical de vent (Fig. 11a) mostra les majors reduccions del vent a l'altura de boixa, amb valors de fins a 0.6 m s^{-1} sobre el parc a les 6 h UTC del 22 de gener. No obstant, els dèficits obtinguts per a la resta d'hores són molt similars, essent aquests superiors en tot moment a 0.4 m s^{-1} . Com ja s'ha comentat a l'inici de la secció, el vent en aquest episodi té un mòdul i direcció aproximadament constant. Així, l'efecte de les turbines és gairebé el mateix durant tota la simulació, tal i com mostren aquests resultats. Anàlogament al cas anterior (Fig. 6a), els efectes no són apreciables per sobre dels 400 m.

La generació de TKE (Fig. 11b) torna a ser màxima al voltant de l'alçada de boixa. L'augment respecte del cas CTRL és aproximadament constant amb el temps i val $0.8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Aquest valor dista notablement dels $2.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ observats per al moment prefrontal del cas d'estudi del Subapartat A. d'aquesta Secció. Com ja s'ha comentat, aquesta menor producció de turbulència respon a l'enregistrament d'un menor vent observat a l'altura de boixa per al cas anticiclònic.

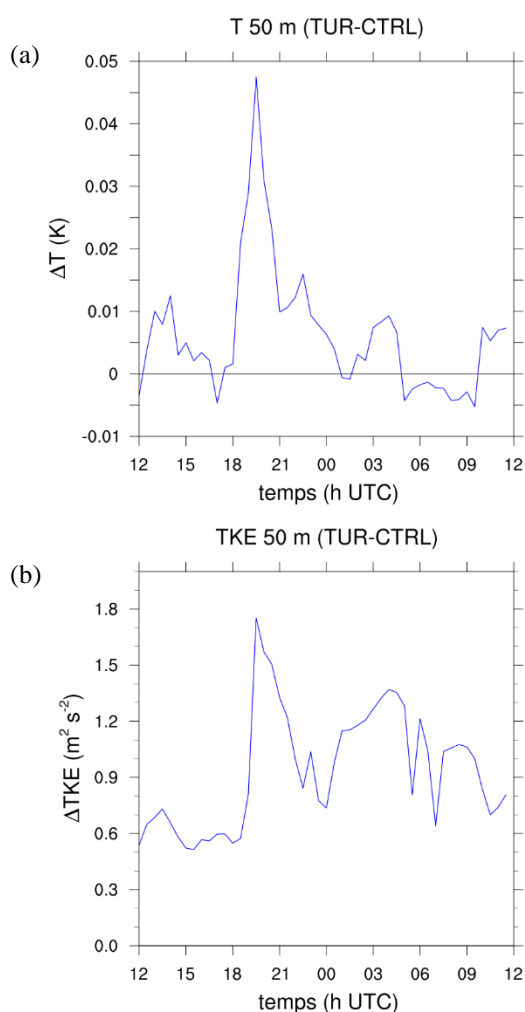


Figura 12: Evolució temporal de (a) la diferència de temperatura i (b) la diferència de TKE sobre el parc entre les simulacions TUR i CTRL.

La representació 30-minutal de l'evolució de temperatura (Fig. 12a) mostra un augment important d'aquesta sobre les turbines entre les 18 i 21 h UTC del 21 de gener, i arriba a un valor proper a 0.05 K. Aquest augment de temperatura sobre el parc coincideix temporalment en una pujada en la producció

de turbulència sobre el parc de fins a $1.7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. La presència d'un major transport vertical induït per la turbulència provoca una major homogeneïtzació vertical de la PBL sobre la instal·lació eòlica, conduint a l'augment de temperatura observat. No obstant, com que l'augment màxim obtingut en la temperatura és de l'ordre de la centèsima, caldria efectuar un estudi posterior per concloure si aquest resultat pot ser representatiu.

Finalment, es passa a estudiar l'estabilitat de la PBL. La velocitat de fregament (Fig. 13a) és major sobre el parc eòlic quan aquest hi és present, i disminueix fins a 0.02 m s^{-1} respecte el cas CTRL a sotavent, en forma d'estela d'uns 4 km de longitud. El flux de calor sensible (Fig. 13b) presenta un comportament contrari. Aquesta magnitud disminueix sobre el parc (fins a 2 W m^{-2}) i augmenta a sotavent (arribant a valors superiors a 2 W m^{-2}). La variació d'aquest flux respecte el cas sense turbines és notable fins a uns 13 km del parc. Amb aquests paràmetres es calcula la longitud de Monin-Obukhov (Fig. 13c). S'observa un petit augment sobre la zona de les turbines, entre 100 i 200 m. Aquest comportament torna a ser reflex d'una petita tendència a la neutralització de la PBL quan s'hi afegeixen les màquines. No obstant, aquesta pujada en la longitud de Monin-Obukhov és menys marcada que l'observada per al cas d'estudi amb un sistema frontal (Fig. 8b). A les parts NE i SO del mapa s'observa soroll numèric, el qual no té sentit físic aquí.

En qualsevol cas, els resultats pel que fa a l'estabilitat de la PBL són qualitativament semblants per als dos casos d'estudi. Si bé és cert que l'homogeneïtzació d'aquesta capa és més marcada per al cas amb un front, la mescla produïda per les pales de les màquines tendeix a neutralitzar la PBL sigui quin sigui el règim sinòptic dominat per la presència de vents forts.

IV. CONCLUSIONS

A partir dels resultats derivats dels experiments presentats en aquest treball i de la discussió realitzada a la secció anterior, hom pot concloure que:

- La parametrització de turbines proposada per Fitch et al (2012) modelitza correctament els efectes i impactes produïts per la presència d'un parc eòlic amb passos de malla d'1 km.
- Qualitativament, els resultats del cas d'estudi marcat pel pas d'un sistema frontal i el cas anticiclònic amb vent fort són similars, tot i que presenten algunes subtils diferències.
- Una instal·lació de turbines eòliques suposa un embornal de moment associat al flux de vent. S'han obtingut reduccions de vent de fins a 0.8 m s^{-1} respecte d'una simulació sense turbines. Els efectes de dèficit de vent han estat observables fins a 26 km a sotavent del parc. Tanmateix, s'han trobat augments del mòdul del vent al final de l'estela i als flancs laterals d'aquesta, que responen als moviments verticals induïts pel gir d'Ekman.
- La reducció del vent difereix en un factor 2 respecte la obtinguda per Fitch et al (2012), així com la longitud de l'estela. A diferència de l'anàlisi de l'article citat, els estudis realitzats aquí són de casos reals, situats en una zona amb topografia complexa, pel que els resultats poden no ser comparables des d'un punt de vista quantitatiu.

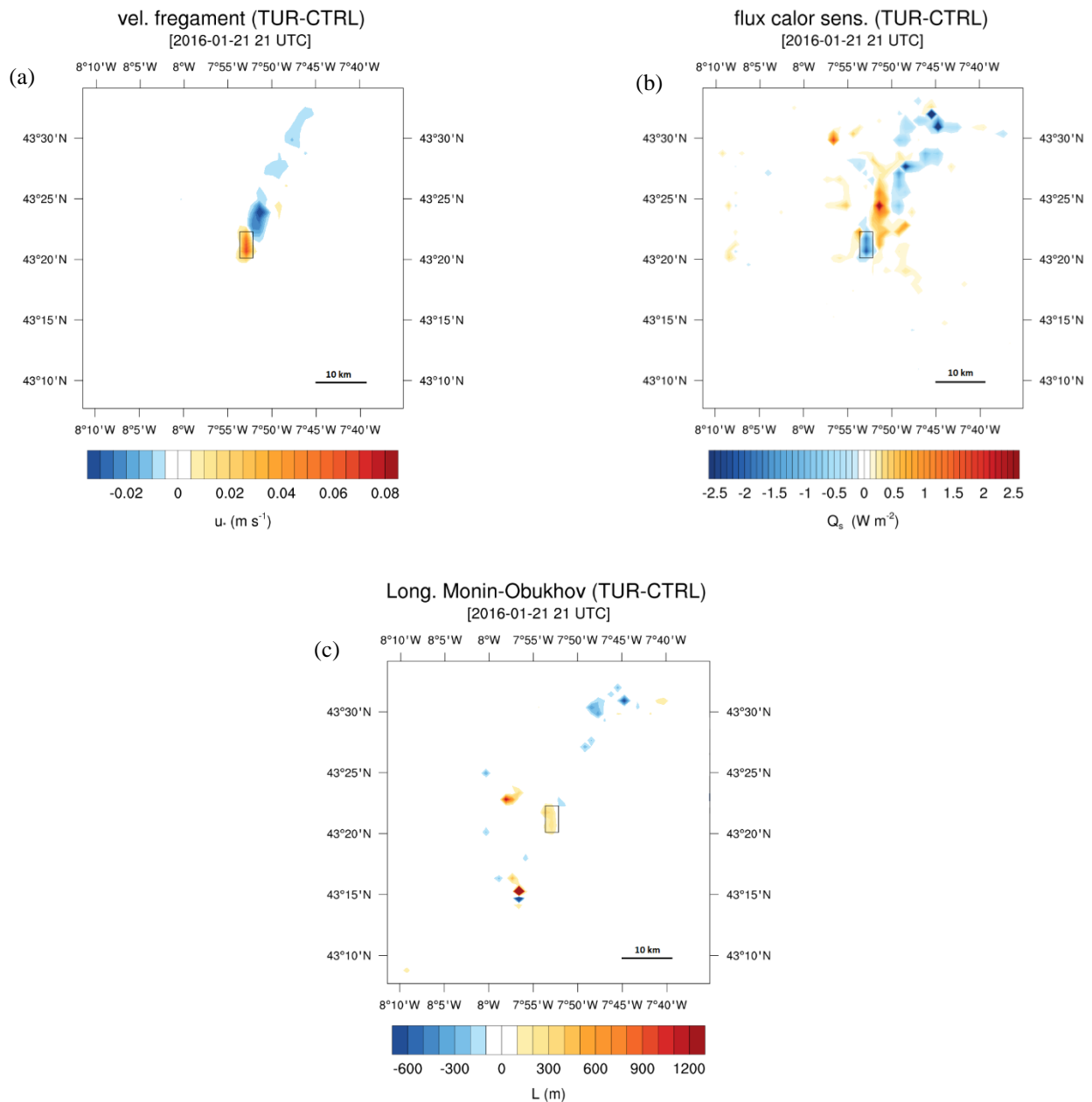


Figura 13: Mapa de diferència de (a) velocitat de fregament, (b) flux de calor sensible i (c) longitud de Monin-Obukhov entre les simulacions TUR i CTRL en capa superficial per a les 21 h UTC del 21 de gener de 2016.

- A més, les turbines són una font de turbulència. S'ha observat un augment de producció TKE de fins a $2.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ respecte la simulació CTRL en presència d'un vent de 21 m s^{-1} del sud-oest. A sotavent de la zona del parc, es produeix un dèficit de turbulència en forma d'estela de fins a 7 km. La gènesi de turbulència és major com més gran sigui el mòdul del vent.
- Els efectes de les turbines en els casos d'estudi aquí considerats són considerables fins a una altura de 400 m. No obstant, en alguns casos de vents molt forts, l'impacte pot superar aquesta alçada.
- La producció de cisalla vertical sobre el parc eòlic també es veu augmentada quan les màquines hi són presents. Aquest comportament explica l'augment de turbulència sobre el mateix. Contràriament, s'obté un dèficit en el flux de calor sensible sobre el parc eòlic de fins a 2 W m^{-2} .
- Les turbines tendeixen a neutralitzar la PBL, amb augments de la longitud de Monin-Obukhov de fins a 500 m. Aquest comportament és més marcat per al cas amb un sistema frontal. Això també és manifesta amb una subtil pujada de la temperatura (i. e. inferior a 0.05 K) sobre les turbines en el cas anticiclònic.

Aquest estudi deixa oberts alguns aspectes que es poden tractar com a treball futur. L'elecció de realitzar un niament en una direcció s'ha fet atenent als propòsits del treball. No obstant, als articles citats a l'estat de l'art no queda clar quina opció proporciona uns resultats més acurats, pel que caldria una verificació exhaustiva al voltant de l'elecció del niament en una direcció o en dues. D'altra banda, aquest article s'ha centrat en una anàlisi de la física de la PBL afectada per la presència d'una instal·lació eòlica. Un altre estudi podria estar enfocat a realitzar una validació de la parametrització de turbines del WRF emprant dades eòliques de potència o dades meteorològiques mesurades en diferents punts i al voltant de les turbines, i avaluar així la robustesa de l'aproximació proposada per Fitch et al (2012).

V. APÈNDIX

A. La parametrització de turbines

En aquest punt es resumeix la parametrització de turbines introduïda per Fitch et al (2012). En cap cas s'ha introduït informació nova i el lector és referit a l'article en qüestió per a més informació. Aquesta aproximació modelitza l'arrossegament provocat per les turbines mitjançant l'avaluació de la fracció total d'energia cinètica extreta de l'atmosfera deguda a les turbines (coeficient d'empenta, C_T). Una part d'aquesta energia extreta, és convertida en energia elèctrica, donada pel coeficient de potència C_P . L'energia que no és aprofitable constitueix l'arrossegament no productiu, ja que s'assumeixen negligibles les pèrdues elèctriques i mecàniques. Aquesta fracció energia sobrant ve donada per la diferència $C_T - C_P$.

A continuació es presenta el desenvolupament matemàtic i físic seguit per Fitch et al (2012), mantenint la notació que els autors fan servir. La ràtio de pèrdua d'energia cinètica de l'atmosfera deguda a una turbina eòlica ve donada per l'Equació 1.

$$\frac{\partial KE_{arro}}{\partial t} = -C_T \frac{1}{2} \rho v V^2 = -\frac{1}{2} C_T \rho |V|^3 A \quad (1)$$

On s'ha considerat el coeficient d'empenta de la màquina, C_T , la densitat de l'aire ρ , el volum v d'aire que interacciona amb l'àrea escombrada per les pales, denotada per $A = (\pi/4)D^2$ (on D és el diàmetre de les pales de l'aerogenerador). Finalment, V representa el vector vent horitzontal $V = (u, v)$.

En aquest punt, cal fer algunes assumpcions. En primer lloc, se suposa que les turbines estan orientades perpendicularment al flux, i a més, l'arrossegament degut a les pales de les turbines no afecta a la component vertical del vent. A més, com que el perfil vertical del vent no és, generalment, uniforme, aquest cal que sigui integrat sobre l'àrea del rotor, A .

D'altra banda, en els models de mesoescala, el pas de malla horitzontal pot ser major que la distància de separació de les turbines del parc. Per aquesta raó, en cada cel·la del model pot haver-hi més d'una turbina. Per tal de tenir-ho en compte, es defineix una densitat horitzontal de turbines donada per N_t^{ij} , on i, j són els índexs de la cel·la del model en les direccions zonal i meridional, respectivament. Totes aquestes aproximacions són introduïdes a l'Equació 1, i aquesta queda transformada en l'Equació 2.

$$\begin{aligned} \frac{\partial KE_{arro}}{\partial t} &= \\ &= -\frac{1}{2} \int_{\Delta x} \int_{\Delta y} N_t^{ij} \left[\int_{AR} C_T \rho |V|^3 dA \right] dy dx = \\ &= -\frac{1}{2} N_t^{ij} \Delta x \Delta y \left[\int_{AR} C_T \rho |V|^3 dA \right] \end{aligned} \quad (2)$$

On $\Delta x, \Delta y$ són els passos de malla del model en les direccions zonal i meridional, respectivament. La integral de l'Equació 2 es pot eliminar discretitzant l'espai com ho fa el model, considerant els índex i, j, k , els quals representen les direccions cartesianes x, y, z respectivament. Amb això s'obté l'Equació 3.

$$\frac{\partial KE_{arro}^{ijk}}{\partial t} = -\frac{1}{2} N_t^{ij} \Delta x \Delta y C_T \rho_{ijk} |V|_{ijk}^3 A_{ijk} \quad (3)$$

Com a exemple, A_{ijk} representaria la secció transversal de l'àrea del rotor d'una turbina eòlica dintre dels nivells $k, k+1$ de la cel·la i, j del model.

Aquesta energia cinètica perduda per part de l'atmosfera deguda a una turbina eòlica és una part que s'extrau de l'energia cinètica total d'una cel·la del model, donada per l'Equació 4.

$$\frac{\partial KE_{cel}^{ijk}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta x} \int_{\Delta y} \int_{\Delta z} \frac{\rho_{ijk}}{2} (u_{ijk}^2 + v_{ijk}^2 + w_{ijk}^2) dx dy dz \quad (4)$$

on $\Delta z = z_{k+1} - z_k$, amb z_k representant l'altura al nivell k del model. Com ja s'ha comentat, només les components horitzontals $V = (u, v)$ es veuen afectades per l'arrossegament de les turbines, per tant, no cal considerar la component vertical a l'equació 4. Utilitzant la notació d'índexs del model i integrant en la vertical l'Equació 4 se simplifica i es transforma en l'Equació 5.

$$\frac{\partial KE_{cel}^{ijk}}{\partial t} = \rho_{ijk} |V|_{ijk} \frac{\partial |V|_{ijk}}{\partial t} (z_{k+1} - z_k) \Delta x \Delta y \quad (5)$$

Si s'assumeix que la pèrdua d'energia cinètica de l'atmosfera és deguda íntegrament a les turbines eòliques, les Equacions 3 i 5 es poden igualar. De l'equació resultant es pot aïllar el terme de tendència de moment, donat per l'Equació 6.

$$\frac{\partial |V|_{ijk}}{\partial t} = -\frac{1}{2} N_t^{ij} C_T |V|_{ijk}^2 A_{ijk} / (z_{k+1} - z_k) \quad (6)$$

La potència extreta per les turbines, què es convertida en energia elèctrica aprofitable ve donada per l'Equació 7.

$$\frac{\partial P_{ijk}}{\partial t} = \frac{1}{2} N_t^{ij} C_T |V|_{ijk}^3 A_{ijk} / (z_{k+1} - z_k) \quad (7)$$

I, com ja s'ha mencionat anteriorment, la potència extreta per les turbines que no és convertida en energia elèctrica, és convertida en TKE (Equació 8).

$$\frac{\partial TKE_{ijk}}{\partial t} = \frac{1}{2} N_t^{ij} (C_T - C_P) |V|_{ijk}^3 A_{ijk} (z_{k+1} - z_k) \quad (8)$$

Amb aquests resultats, es conclou que la parametrització introduïda per Fitch et al (2012) representa els efectes de les turbines en l'atmosfera imposant un embornal de moment (Equació 6), transferint una fracció de l'energia cinètica a energia elèctrica (Equació 7), i la resta a TKE (Equació 8).

B. Característiques de les turbines

Les característiques tècniques de les 24 turbines que conformen el parc Sotavento-Galicia es detallen a la Taula II. Les dades presents a la Taula II han sigut proporcionades pels respectius fabricants de cada model, i estan disponibles a la pàgina web del parc (<http://www.sotaventogalicia.com/es>). En la columna 3 de la Taula II es presenta l'alçada de caixa, la qual es defineix com la distància des de la plataforma al rotor d'una turbina eòlica instal·lada i indica l'elevació de la turbina respecte del sòl, sense incloure la longitud de les pales de la turbina. Per la seva banda, a la cinquena columna es presenta el coeficient estàtic d'empenta. Aquest és el valor imposat al coeficient d'empenta per a valors de velocitats de vent per sota de la velocitat d'arrancada i per sobre de la velocitat de parada. No es disposaven dades d'aquest paràmetre, pel que s'ha

decidit imposar el valor 0.158 (Cervarich et al 2013). Així mateix, els coeficients de potència i empenta de cada màquina tenen dependència amb la velocitat del vent. Se'n mostra, com a exemple, les corbes de potència i empenta del model de turbina Made AE-46 (Fig. 14).

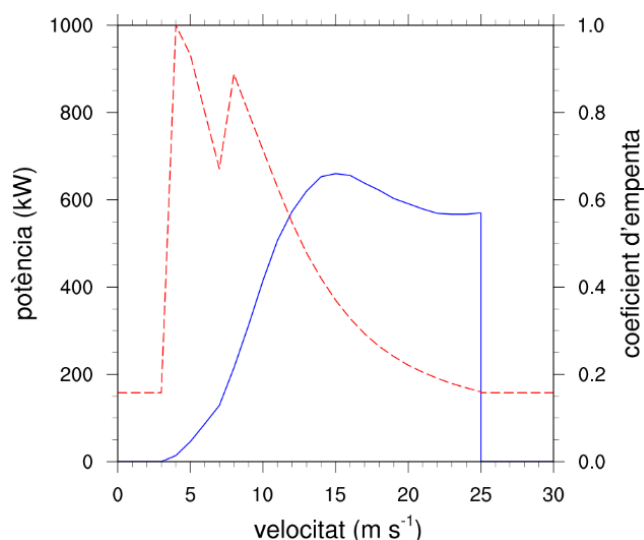


Figura 14: Corbes de potència i empenta de la turbina Made AE-46.

Taula II: Característiques tècniques de les turbines del parc eòlic Sotavento-Galicia (veure Fig. 15).

Identificador	Model	Alçada de caixa (m)	Potència nominal (kW)	Coeficient estàtic d'empenta	Diàmetre (m)
1	Izar-Bonus 1.3 MW	49	1300	0.158	62
2	Neg Micon NM-48 750	45	750	0.158	48
3	Gamesa G-47	45	660	0.158	47
4	Ecotecnica 44/640	46	640	0.158	44
5	Izar Bonus MK-IV	40	600	0.158	44
6	Made AE-46	45	660	0.158	46
7	Gamesa G-47	45	660	0.158	47
8	Neg Micon NM-48 750	45	750	0.158	48
9	Izar Bonus MK-IV	40	600	0.158	44
10	Made AE-46	45	660	0.158	46
11	Ecotecnica 44/640	46	640	0.158	44
12	Neg Micon NM-52 900	45	900	0.158	48
13	Neg Micon NM-48 750	45	750	0.158	48
14	Gamesa G-47	45	660	0.158	47
15	Ecotecnica 44/640	46	640	0.158	44
16	Made AE-52	50	800	0.158	52
17	Made AE-46	45	660	0.158	46
18	Izar Bonus MK-IV	40	600	0.158	44
19	Gamesa G-47	45	660	0.158	47
20	Neg Micon NM-48 750	45	750	0.158	48
21	Ecotecnica 44/640	46	640	0.158	44
22	Izar Bonus MK-IV	40	600	0.158	44
23	Made AE-46	45	660	0.158	46
24	Made AE-61	60	1320	0.158	61

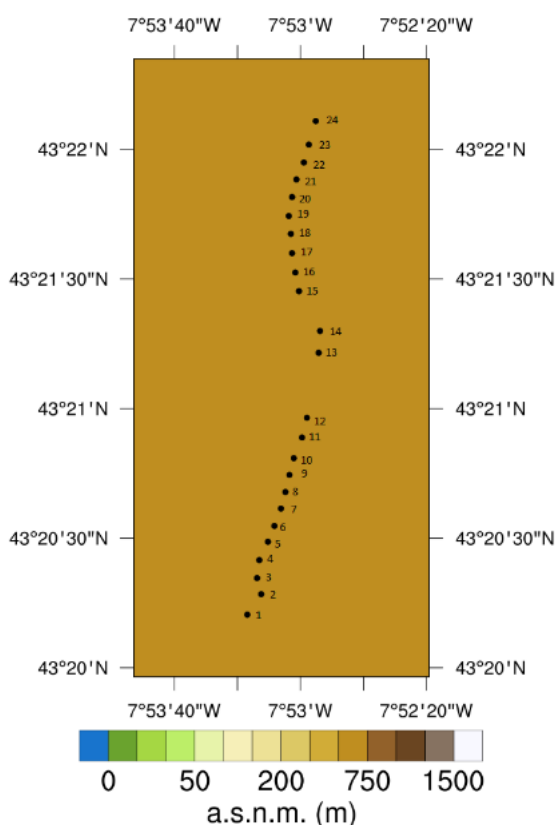


Figura 15: Distribució de les 24 turbines eòliques del parc Sotavento-Galícia.

Agraïments

Al Dr. Àlex Montornès (tutor del treball) i al grup Vortex SL, per tota l'ajuda prestada, endinsar-me en el món de la modelització i l'eòlica i amb qui ha estat un plaer treballar. A les Dns. Maria Rosa Soler i Mireia Udina (cotutora del treball), per haver-me proporcionat un lloc de treball a la Universitat de Barcelona. Al Dr. Bernat Codina, qui ha facilitat la màquina *Boira* per tal de desenvolupar les simulacions i portar a terme tot el post-procés. A tot l'equip d'NCAR, per haver proporcionat les eines de treball. Finalment, agraeixo al parc eòlic Sotavento-Galícia, qui ha ofert les seves dades eòliques de forma lliure per tal de realitzar les simulacions.

VI. REFERÈNCIES

- Beljaars A C M, 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121: 255–270.
- Christiansen M B, Hasager C B, 2005: Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3): 251-268.
- Cervarich M C, Roy S B, Zhou L, 2013: Spatiotemporal structure of wind farm-atmospheric boundary layer interactions. *Energy Procedia*, 40: 530-536.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M A, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal*

Meteorological Society, 137 (656): 553-597. DOI: 10.1002/qj.828

Dudhia J, 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46: 3077–3107.

Dyer A J, Hicks B B, 1970: Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96: 715–721.

Fitch A C, Olson J B, Lundquist J K, Dudhia J, Gupta A K, Michalakes J, Barstad L, 2012: Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parametrized in a Mesoscale NWP Model. *American Meteorological Society*, 140: 3017-3038. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00352.1

Fitch A C, Olson J B, Lundquist J K, 2013: Mesoscale Influences of Wind Farms throughout a Diurnal Cycle. *American Meteorological Society*, 141: 2173-2198. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00185.1

Jiménez P A, Navarro J, Palomares A M, Dudhia J, 2014: Mesoscale modeling of offshore wind turbine wakes at the wind farm resolving scale: a composite-based analysis with the Weather Research and Forecasting model over Horns Rev. *Wind Energy*, 18: 559-566. DOI: 10.1002/we.1708

Kaldellis J K, Zafirakis D, 2011: The wind energy (r)evolution: A short review of a long story. *Renewable Energy*, 36: 1887-1901.

Kessler E, 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Meteor. Monogr.*, 32, Amer. Meteor. Soc.

Martinez A, Perez A, 1999: *Atlas Climático de Galicia*. Xunta de Galicia.

Mlawer E J, Steven J T, Patrick D B, Iacono M J, Clough S A, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102: 16663–16682.

Montornès A, Codina B, Zack J W: A discussion about the role of shortwave schemes on real WRF-ARW simulations. Two case studies: cloudless and cloudy sky. *Tethys*, 12: 13-31. DOI:10.3369/tethys.2015.12.02

Nakanishi M, Niino H, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87: 895–912.

Paulson C A, 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, 9: 857–861.

Pielke RA, 2002: *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press: San Diego, CA, USA.

Skamarock, W C, Klemp J B, Dudhia J, Gill, D O, Barker D M, Duda MG, Huang X, Wang W, Powers J D 2008: A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

Smagorinsky J, 1963: General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91(3): 99-164.

- Stull R B, 1988: An introduction to boundary layer meteorology. Springer.
- Tewari M, Chen F, Wang W, Dudhia J, LeMone M A, Mitchell K, Ek M, Gayno G, Wegiel J, Cuenca R H, 2004: Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.
- Vázquez C, Telsnig T, Villalba A, 2017: JRC Wind Energy Status Report 2016 Edition. Joint Research Centre. Últim accés: 29 de juny de 2017. Disponible a: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC105720/kjna28530enn.pdf>
- Wang T, 2012: A brief review on wind turbine aerodynamics. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2 (062001). DOI: 10.1063/2.1206201
- Warner T T, 2011: Numerical Weather and Climate Prediction. Cambridge University Press. Últim accés: 25 de juny de 2017. Disponible a: http://www.irimo.ir/parameters/weather/modules/cdk/upload/content/general_content/File/kotobolomjavi/Numerical Weather and Climate Prediction 2011.pdf
- Webb E K, 1970: Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96: 67–90.
- Zhang D L, Anthes R A, 1982: A high-resolution model of the planetary boundary layer— sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. J. Appl. Meteor., 21: 1594–1609.